

早稲田大学博士論文(概要)		
	学位記	文科省報告
2006	4325	甲 2285 乙

早稲田大学大学院理工学研究科

博士論文概要

論文題目

高圧キセノンガス中における電子の輸送過程
— 分子性ガスによる電子温度冷却効果 —

Electron transport process in high-pressure xenon gas
— Cooling of electron temperature by molecular gases —

申請者

小林

進悟

Shingo

Kobayashi

物理学及応用物理学専攻・宇宙放射線物理学研究

2006 年 7 月



希ガスキセノンは放射線検出器の媒質として優れた特性を示し、キセノンを利用した検出器は理学、工学、医学など幅広い分野で利用されている。物理学の分野では、二重ベータ崩壊の探索、暗黒物質の探索、ニュートリノ振動の研究など、基本的問題を探求する大規模な装置に大量のキセノンを利用する計画が進行している。また惑星科学の分野では、月・惑星表面物質の化学組成を求める観測機器として、高圧キセノンを用いたガンマ線撮像装置は、従来に比べ高い解像度を有する次世代ガンマカメラとして期待されている。更に、原子力、加速器施設での空間放射線のモニタリング、医学分野では PET への応用が期待されている。

近年活発に開発が進められている気体キセノン放射線検出器にいくつか共通するねらいとしては、①位置情報の取得、②高圧化の2点がある。最初の『位置情報の取得』とは、検出器中に多数の信号読み出し電極を配置し、電磁放射線が相互作用した位置や荷電粒子線の飛跡といった放射線の位置をサブミリメートル程度のスケールで決定し位置情報を取得することで、従来のカロリメータやスペクトロメータとしての機能に加えてガンマ線の到来方向やその強度に関するイメージングを行なうというものである。また二番目の『高圧化』とは、気体キセノン放射線検出器のガス圧を上昇させることで検出器の検出効率の増大を狙ったものである。大気圧程度のキセノンガスを封じた気体キセノン検出器ならびに液体キセノン検出器の歴史は古いが、数 MPa 程度のキセノンガスを充填した高圧キセノン検出器が優れたエネルギー分解能を有するスペクトロメータとして動作することが知られたのは比較的新しい。気体放射線検出器の検出原理は、主に検出器に入射した放射線の電離作用の結果生じた電子群を電場で掃引し電極に集めることを基本とするため、①、②の達成のためには高圧キセノンガス中での電場による電子輸送過程を把握しておくことが不可欠である。特に『位置情報の取得』という観点からキセノン中での電子拡散は位置の決定精度を与えるため、拡散の大きさや拡散の制御法が解明されれば、次世代のキセノン検出器開発の点で大変有益である。

しかしながら希ガスキセノン中での電子輸送過程の研究では多くの未解明な点が残されている。事実、純キセノンガス中の電子の横拡散係数 D_T (電気力線に対し垂直な面内での拡散係数) と電子の移動度 μ との比に電気素量 e を掛けた量、すなわち特性エネルギー ($\varepsilon_T = eD_T/\mu$) は、電場中で一定距離電子群をドリフトさせたときの拡散の大きさに関係する量であるが、これまでの研究で得られた値は研究者によりまちまちであり、確定しているとはいえない。さらに高圧キセノン中での ε_T や縦拡散係数 D_L (電気力線に対し平行な方向への拡散係数) の測定結果は、皆無である。一般的に希ガス中での電子輸送係数は微量の分子性ガスの混合によって大きく変化することが知られているが、キセノンガスに対し分子性ガス

の効果が系統的に調べられたことがない。しかしこの効果は応用上非常に興味深いものである。本研究では、高圧キセノンガス中での電子の輸送係数（ドリフト速度 W 、特性エネルギー ε_T 、縦拡散係数 ND_L ）、特に拡散現象に焦点を当て、電子輸送係数とその密度効果、輸送係数の微量分子性ガスの影響を解明することを目的とする。そのために高圧キセノンとキセノン・水素混合ガス、キセノン・メタン混合ガス（以下それぞれ、Xe、Xe+H₂、Xe+CH₄）中での電子輸送係数の測定を行なった。本論文は全六章から構成され、以下に各章に関しての概要を述べる。

第1章「序論」では本研究の背景とその目的を示した。Xeは原子番号が54と大きいいためガンマ線との相互作用の確率が高く、また高圧キセノンを用いた放射線検出器はエネルギー分解能に優れ、幅広い動作温度範囲や放射線損傷に対する耐久性などからガンマ線撮像装置として注目を浴びており、現在精力的に開発が行なわれている。高圧Xe撮像装置を構成するには高圧ガス中での電場による電子輸送過程を把握する必要がある、特に放射線イメージングという観点からは、高圧Xe中での電子の拡散の大きさと微量分子性ガスによる拡散の制御といったことが非常に重要である。本研究では電子の輸送係数の測定を通して高圧Xeガス中の電子輸送過程を明らかにし、微量の不純物が輸送係数に与える影響に関して調べることを目的としている。以上について詳細に述べている。

第2章「キセノンガス中における電子輸送」では、従来の電子輸送係数の研究状況に関して論じた。これまでの研究では電子のドリフト速度はその測定法の簡便さから多くの測定結果が得られているが、特性エネルギーや縦拡散係数の研究は殆どなく、特に高圧領域での報告は皆無である。さらに電子輸送を考える際に重要な電子・Xe散乱での運動量移行断面積と電子輸送係数との関係を示し、 $N\mu(E/N)$, $\varepsilon_T(E/N)$, $ND_L(E/N)$ は低圧Xe中では密度に依存しないことを示す。またボルツマン輸送方程式により、微量分子性ガスを含むキセノンガス中での電子輸送の考え方に関して論じた。

第3章「Xe, Xe+H₂, Xe+CH₄中の電子輸送係数の測定法」では、電子の特性エネルギー ε_T 、ドリフト速度 W 、縦拡散係数 ND_L を測定するための、新しく考案した測定装置について、その測定原理と装置の構成、データ解析方法について議論した。この装置はキセノンフラッシュランプを用いた電子源、平行平板電極、信号処理システム、ガス供給システムから構成されている。電子源で作られた電子群は、平行平板電極間の静電場から力を受けて高圧キセノン中をドリフトする。その電子群を複数のストリップ電極で収集し、各電極での収集電子数が決定される。それぞれのストリップ電極の空間的位置とそれらに収集された電子数の関係

から ϵ_T が得られ、電子群が収集電極に到達した時間とそのゆらぎから W , ND_L を得ることができる。この装置の特徴は、①収集電極を構成するストリップ電極の数を増やしデータの信頼性を上げていること、②Xe 純度をモニタリングする装置を有すること、③ W , ϵ_T , ND_L を 1 つの装置で測定できるのでガス純度や実験条件の違いによる系統誤差なしにそれぞれの電子輸送係数の関係を明らかにできる、という点で従来報告された装置に比べ多くの点で優れている。

第 4 章「測定結果」では、Xe、Xe+H₂、Xe+CH₄ 中で電子輸送係数の測定範囲、測定条件、測定結果とその測定誤差をまとめた。測定したガスの圧力は最高で 1MPa であり、いくつかは 1MPa 以下の低圧でのデータも取得した。 ϵ_T , ND_L の高圧 Xe 中での値の報告は本研究が初めてである。また、分子性ガスの H₂ や CH₄ の濃度を系統的に変化させ、その濃度と ϵ_T との関係を示した研究例は他にはない。

第 5 章「考察」では、測定結果から ϵ_T の絶対量、電子輸送係数の密度効果、 ϵ_T と微量分子性ガスの濃度間に成立するスケーリング則について議論した。Xe 中では、 ϵ_T は換算電場 $E/N=0.1 \times 10^{-17} \text{Vcm}^2$ において約 2eV の値を持つことが明らかになった。従来、本研究で得られた ϵ_T より小さな値を示す研究報告がなされた例もあるが、その問題点に関して本研究のドリフト速度の測定結果を含めて総合的に議論した。0.5MPa、1MPa における Xe ガスの ϵ_T は、 $0.1 \times 10^{-17} \text{Vcm}^2$ 以上の高電場では 5% 以内で一致することから、 ϵ_T の有意な密度効果はないことが明らかになった。しかしながら、低電場領域において ND_L は密度効果が存在するような兆候が得られた。Xe に H₂ や CH₄ を混合すると、電子はこれら分子性ガスとの非弾性散乱により冷却させられ、拡散が抑えられることが判った。ドーピング濃度 χ を、H₂ については 0.10%, 0.21%, 0.42%, 2.6% と変化させ、CH₄ については 0.97% と 2.9% として Xe 混合ガス中の ϵ_T を測定したが、 ϵ_T を $E/\{N(\chi(1-\chi))^{0.5}\}$ という変数の関数としてプロットすると、H₂ が 2.6% の場合を除いてそれぞれ濃度に依存せずに一定の曲線が描けること、すなわち、微量分子性ガスによる電子冷却効果をスケーリング則であらわすことができることを明らかにした。スケーリング則は成立する範囲に制限があるが、H₂、CH₄ 濃度と電子の拡散の大きさを簡便な方法で関連付けることができるため、キセノン検出器の開発に非常に有効である。またスケーリング則の適用濃度範囲が CH₄ に比べて H₂ の方が狭いのは、H₂ の運動量移行断面積が Xe のそれに比べ比較的大きいためであることが予想される。

第 6 章「総括と今後の展望」では本研究により明らかになった気体キセノン中の電子輸送を包括的にまとめ、高圧キセノンガス中の電子輸送過程の更なる解明にむけた展望を述べた。

研 究 業 績

種 類 別	題名、 発表・発行掲載誌名、 発表・発行年月、 連名者（申請者含む）
論 文	<p>○ <u>S. Kobayashi</u>, K. Iwamatsu, T. Ishizaki, N. Hasebe, T. Hosojima, M. Mimura, T. Miyachi, M. Miyajima, K. Pushkin, C. Tezuka, T. Doke, E. Shibamura and A. Ishizuka: "Ratio of Transverse Diffusion Coefficient to Mobility of Electrons in High-Pressure Xenon and Xenon Doped with Hydrogen", (掲載決定)</p> <p>○ <u>S. Kobayashi</u>, N. Hasebe, T. Igarashi, T. Miyachi, M. Miyajima, H. Okada, T. Doke, E. Shibamura, V. V. Dmitrenko and K. F. Vlasik: "Ratio of Transverse Diffusion Coefficient to Mobility of Electrons in High-Pressure Xenon", Jpn. J. Appl. Phys. Vol. 43, No. 8A, 2004, pp. 5568-5572.</p>
講 演	<p><u>S. Kobayashi</u>, T. Doke, N. Hasebe, T. Hosojima, T. Ishizaki, K. Iwamatsu, M.-N. Kobayashi, M. Mimura, T. Miyachi, M. Miyajima, K. Pushkin, C. Tezuka, E. Shibamura, A. Ishizuka: "Measurement of electron transport coefficient in high-pressure xenon gas", Proc. of the 2nd Inter. Workshop on Appl. of Rare Gas Xenon to Sci. and Tech. (XeSAT2005), March 8-10, 2005, Waseda Univ., Tokyo, Japan, pp. 9-12.</p> <p><u>S. Kobayashi</u>, C. Chong, N. Hasebe, T. Igarashi, T. Miyachi, H. Okada, E. Yokoyama, T. Doke, E. Shibamura, V. V. Dmitrenko, V. M. Grachev, S. E. Ulin and K. F. Vlasik: "Measurement of transverse characteristic energies of electrons in high-pressurized xenon doped with hydrogen", International seminar: "High pressure xenon", Scientific session in Moscow Engineering Physics Institute (State University), January 27-31, 2003, pp. 192-193.</p> <p><u>S. Kobayashi</u>, N. Hasebe, T. Miyachi, H. Okada, M. Takenouchi, T. Doke, E. Shibamura, I. V. Chernysheva, V. V. Dmitrenko, V. M. Grachev, S. E. Ulin and K. F. Vlasik: "Diffusion and Drift of Electrons in High-Pressure Xenon Gas", Scientific Session of MEPhI-2002, Moscow Engineering Physics Institute (State University), Russia, 21-25 January 2002, 53-54.</p>
その他 (論文)	<p>○ <u>S. Kobayashi</u>, N. Hasebe, T. Hosojima, T. Igarashi, M.-N. Kobayashi, M. Mimura, T. Miyachi, M. Miyajima, K. N. Pushkin, H. Sakaba, C. Tezuka, T. Doke, E. Shibamura: "A new generation γ-ray camera for planetary science applications: High pressure xenon time projection chamber", Adv. Space. Res. 37 (2006) 28-33.</p> <p>○ <u>S. Kobayashi</u>, N. Hasebe, T. Igarashi, M.-N. Kobayashi, T. Miyachi, M. Miyajima, H. Okada, O. Okudaira, C. Tezuka, E. Yokoyama, T. Doke, E. Shibamura, V. V. Dmitrenko, S. E. Ulin, K. F. Vlasik: "Scintillation luminescence for high-pressure xenon gas", Nucl. Inst. & Meth. A531, 2004, pp. 327-332.</p>

研究業績

種 類 別	題名、 発表・発行掲載誌名、 発表・発行年月、 連名者（申請者含む）
その他 (講演)	<p>○ <u>S. Kobayashi</u>, V. V. Dmitrenko, T. Doke, V. M. Grachev, N. Hasebe, T. Igarashi, T. Miyachi, H. Okada E. Shibamura, M. Takenouchi, S. E. Ulin and K. F. Vlasik "Measurement of Electron Drift Velocities in the Mixture of Xe and He for a New High-Pressure Xe Gamma-Ray Detector", Jpn. J. Appl. Phys. Vol. 42, 2003, pp. 333-334.</p> <p>○ <u>S. Kobayashi</u>, T. Doke, N. Hasebe, T. Igarashi, T. Miyachi, H. Okada, M. Takenouchi, E. Shibamura, V. V. Dmitrenko, V. M. Grachev, S. E. Ulin and K. F. Vlasik: "Planetary science application of high pressure xe gamma-ray spectrometer", Proc. of the 23rd Inter. Symp. On Space Tech. and Sci., Matsue, May26-June2, pp.1934-1938, 2002.</p> <p><u>S. Kobayashi</u>, "A Next Generation Gamma-ray Camera for imaging of planetary surfaces", The Third 21COE Symposium: Astrophysics as Interdisciplinary Science, Waseda Univ., Tokyo, Japan, Sep.1-3, 2005.</p> <p>K. Pushkin, N. Hasebe, C. Tezuka, <u>S. Kobayashi</u>, M. Mimura, T. Hosojima, M. Kobayashi, T. Doke, M. Miyajima, E. Shibamura, V. Dmitorenko and S. Ulin: "Study of Luminescence output in high pressure xenon with additive Methene", XeSAT2005 (Applications of Rare Gas Xenon to Science and Technology) March 8-10, 2005, Waseda Univ., Tokyo, Japan, 2005, pp. 19-22</p> <p>T. Hosojima, N. Hasebe, <u>S. Kobayashi</u>, M. Mimura, T. Miyachi, M. Miyajima, K. Pushkin, C. Tezuka, T. Doke, E. Shibamura: "Angular resolution of planetary gamma-ray imager using high pressure Xe time-projection-chamber.", XeSAT2005 (Applications of Rare Gas Xenon to Science and Technology) March 8-10, 2005, Waseda Univ., Tokyo, Japan, 2005, pp 60-63.</p> <p>C. Tezuka, N. Hasebe, T. Doke, M. Miyajima, T. Miyachi, M. N. Kobayashi, <u>S. Kobayashi</u>, M. Mimura, T. Hosojima, E. shibamura, K. N. Pushkin: "Requirements for developing high pressure XeTPC using a gas mixture of Xe-H₂ and Xe-CH₄.", XeSAT2005 (Applications of Rare Gas Xenon to Science and Technology) March 8-10, 2005, Waseda Univ., Tokyo, Japan, 2005, pp. 64-67.</p>

研究業績

種 類 別	題名、 発表・発行掲載誌名、 発表・発行年月、 連名者（申請者含む）
	<p>N. Hasebe, T. Doke, M. Hareyama, T. Hosojima, M. Kobayashi, <u>S. Kobayashi</u>, T. Miyachi, M. Miyajima, O. Okudaira, K. Pushkin, K. Sakurai, E. Shibamura, C. Tezuka and N. Yamashita: "Nuclear gamma-ray imaging spectroscopy for planetary exploration", XeSAT2005 (Applications of Rare Gas Xenon to Science and Technology) March 8-10, 2005, Waseda Univ., Tokyo, Japan, 2005, pp. 116-123.</p> <p>K. N. Pushkin, N. Hasebe, T. Doke, <u>S. Kobayashi</u>, T. Hosojima, M. Mimura, M. Miyajima, T. Miyachi, M. Kobayashi, C. Tezuka, E. Shibamura, V. V. Dmitrenko, S. E. Ulin; "Scintillation Yield in High Pressure Xenon and Xenon Doped with Methane," IEEE Nuclear Science Symposium, Rome, Italy, Oct. 16 - 22, 2004, Ergife Palace Hotel.</p> <p>C. Tezuka, N. Hasebe, <u>S. Kobayashi</u>, T. Igarashi, M. Mimura, T. Hosojima, M. N. Kobayashi, T. Doke, M. Miyajima, T. Miyachi, H. Okada, E. Shibamura, K. N. Pushkin, S. E. Ulin, V. V. Dmitrenko, K. F. Vlasik; "Electron diffusion and scintillation in high-pressure Xe doped with H₂ for high-pressure Xe time projection chamber," IEEE Nuclear Science Symposium, Rome, Italy, Oct. 16 - 22, 2004, Ergife Palace Hotel.</p> <p>M. Kobayashi, N. Hasebe, A. A. Berezhnuy, M. Fujii, T. Hiramoto, <u>S. Kobayashi</u>, S. Murasawa, T. Miyachi, O. Okudaira, E. Shibamura, C. Tezuka, N. Yamashita: "Gamma-ray spectrometer for SELENE mission", Proc. of the 36th ISAS Lunar and Planetary Symp., Aug. 4-6, pp. 133-140, 2003.</p> <p>O. Okudaira, C. Chong, N. Hasebe, T. Igarashi, T. Miyachi, H. Okada, <u>S. Kobayashi</u>, M. Takenouchi, E. Yokoyama, T. Doke, E. Shibamura, V. V. Dmitrenko, V. M. Grachev, S. E. Ulin and K. F. Vlasik: "Measurement of electron drift velocity in the mixture of Xe and He for a new high-pressure Xe gamma-ray detector", International seminar: "High pressure xenon", Scientific session in Moscow Engineering Physics Institute (State University), January 27-31, 2003, pp. 202-203.</p> <p>K. F. Vlasik, N. Hasebe, T. Doke, V. V. Dmitrenko, O. B. Batkov, I. V. Chernysheva, V. M. Grachev, <u>S. Kobayashi</u>, T. Miyachi, H. Okada, E. Shibamura, D. V. Sokolov, M. Takenouchi, S. E. Ulin and Z. M. Uteshev: "High pressure xenon gamma-ray spectrometer for planetary remote sensing," Scientific Session of MEPhI-2002, Moscow Engineering Physics Institute (State University), Russia, 21-25 January 2002, pp. 61-62.</p>